

534,587

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
27 mai 2004 (27.05.2004)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2004/045063 A1

(51) Classification internationale des brevets⁷ :

H03B 15/00, H01L 27/18

Denis-Gérard [FR/FR]; THALES Intellectual Property,
31-33, avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil (FR).

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/EP2003/050801

(74) Mandataires : ESSELIN, Sophie etc.; THALES Intellectual Property, 31-33, avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil Cedex (FR).

(22) Date de dépôt international :

7 novembre 2003 (07.11.2003)

(81) États désignés (*national*) : JP, US.

(25) Langue de dépôt :

français

(84) États désignés (*régional*) : brevet européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR).

(26) Langue de publication :

français

(30) Données relatives à la priorité :

02 14124

12 novembre 2002 (12.11.2002)

FR

Publiée :

- avec rapport de recherche internationale
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues

(71) Déposant (*pour tous les États désignés sauf US*) : THALES [FR/FR]; 45, rue de Villiers, F-92526 Neuilly-sur-Seine (FR).

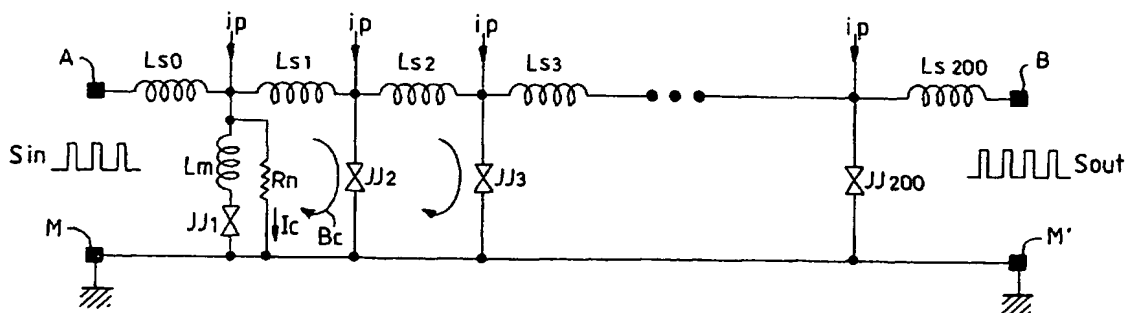
En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

(72) Inventeur; et

(75) Inventeur/Déposant (*pour US seulement*) : CRETE,

(54) Title: DEVICE FOR REDUCING PHASE NOISE

(54) Titre : DISPOSITIF DE REDUCTION DU BRUIT DE PHASE



(57) Abstract: Disclosed is a device for reducing the phase noise of a signal (Sin) emitted by a quasi-periodic source having a basic frequency f_0 . Said device is provided with a superconducting circuit comprising an active line for transmitting voltage pulses by transferring flux quanta Φ_0 . Said circuit is defined so as to be provided with a characteristic frequency f_c such that $0.3 f_c$ is smaller than or equal to the basic frequency f_0 of the quasi-periodic signal (Sin) applied at the input while supplying a voltage pulse signal having the basic frequency f_0 at the output.

(57) Abrégé : Un dispositif de réduction du bruit de phase d'un signal (Sin), issu d'une source quasi-périodique de fréquence fondamentale f_0 , comprend un circuit supraconducteur à ligne active de transmission d'impulsions de tension par transfert de quanta de flux Φ_0 . Ce circuit est défini pour avoir une fréquence caractéristique f_c telle que $0,3 f_c$ soit inférieur ou égal à la fréquence fondamentale f_0 du signal quasi-périodique (Sin) appliqué en entrée, et fournit en sortie un signal d'impulsions de tension de fréquence fondamentale f_0 .

WO 2004/045063 A1

DISPOSITIF DE REDUCTION DU BRUIT DE PHASE

La présente invention se rapporte à un dispositif de réduction du bruit de phase dans un signal issu d'une source quasi-périodique.

Elle s'applique plus particulièrement aux circuits logiques à supraconducteurs, notamment aux circuits logiques en technologie RSFQ
5 (acronyme anglo-saxon pour *Rapid Single Flux Quantum*).

D'une manière générale les systèmes logiques utilisent au moins un signal d'horloge pour les fonctions de séquençement et de synchronisation. Les signaux d'horloge sont générés de façon habituelle par des oscillateurs. Ces signaux quasi-périodiques ne sont pas parfaitement
10 purs, malgré l'intégration de filtres résonants dans les oscillateurs. Si on prend la représentation de la densité spectrale d'un signal quasi-périodique généré par un oscillateur, on observe ainsi un bruit de plancher : c'est le bruit blanc du spectre, correspondant à un bruit de phase à court terme du signal quasi-périodique. Les circuits à verrouillage de phase habituellement utilisés
15 dans les systèmes numériques (calculateurs ou autre) ne permettent pas de réduire ce bruit de phase à court terme : leur action a un effet de stabilisation à long terme, pour empêcher les dérives en fréquence.

Dans la suite, on entend par bruit de phase, le bruit correspondant au plancher de bruit ou bruit blanc du spectre de fréquence du signal. Un
20 objet de l'invention est un dispositif de réduction de ce bruit de phase. Un tel dispositif est particulièrement intéressant dans le domaine de l'électronique numérique rapide. Il permet notamment de réduire la gigue du signal d'horloge, particulièrement gênante dans les circuits numériques haute et très haute fréquence.

25 Dans les systèmes électroniques numériques rapides, une famille logique s'est développée, utilisant les circuits supraconducteurs. C'est la famille logique RSFQ (acronyme anglais de "*Rapid Single Flux Quantum*"), basée sur l'utilisation de la quantification du flux magnétique, et le transfert de quanta de flux ϕ_0 individualisés. Dans cette approche, le traitement
30 logique de l'information revient à manipuler des impulsions de tension résultant du passage des quanta de flux dans des boucles de courant. Un

des éléments de base de cette famille logique à supraconducteurs, est la jonction Josephson shuntée, qui permet le transfert ou le maintien d'un quantum de flux individualisé, le passage d'un quantum de flux dans la jonction se traduisant par l'apparition d'une impulsion de tension à ses bornes telle que $\int V dt = h / 2e = \phi_0 = 2,07 \cdot 10^{-15}$ webers (h, constante de Planck). Avec des technologies actuelles, l'impulsion de tension a ainsi une amplitude de l'ordre de 2 millivolts sur 1 picoseconde.

Chaque jonction est définie par un courant critique I_c et une résistance normale R_n , fonction de sa géométrie et de la technologie utilisée.

10 La fonction de propagation/transfert est assurée par une commande en courant de polarisation de la jonction appropriée, qui permet d'augmenter ou d'affaiblir le courant traversant la jonction, permettant ainsi le maintien dans la boucle ou le transfert du quantum de flux à travers la jonction, dans la boucle suivante.

15 La logique RSFQ a abouti à de nombreux circuits logiques tels que des convertisseurs analogiques/numériques, des mémoires à accès aléatoire, des processeurs de traitement de signal calculant des transformées de Fourier rapides, qui peuvent fonctionner à très haute fréquence. La limite haute de fonctionnement des éléments logiques RSFQ

20 est donnée par leur fréquence critique, fonction de leur géométrie et de la technologie employée (tri-couche, planaire...). Cette fréquence caractéristique est donnée par l'équation suivante :

$f_c = I_c R_n / \phi_0$ où I_c est le courant critique de la jonction, R_n , la résistance normale et ϕ_0 , le quantum de flux, égal à $2,07 \cdot 10^{-15}$ webers.

25 On trouvera un récapitulatif intéressant des applications de la logique RSFQ dans l'article de Konstantin K. Likharev "*Progress and prospects of superconducting electronics*", (Superconducting Science Technology, 3 - 1990 - pages 325-337).

Un autre élément actif de la logique RSFQ est la ligne de transmission Josephson. Une ligne de transmission Josephson est une ligne

30 comprenant des jonctions Josephson shuntées en parallèles, couplées entre elles par des inductances supraconductrices. Une telle ligne permet la propagation des quanta de flux individualisés (Single Flux Quantum), et sert donc comme support de transport d'information logique.

Une impulsion très brève de tension, de l'ordre de 2 millivolts sur 1 picoseconde, qui est appliquée en entrée d'une telle ligne, se propage le long de cette ligne par propagation d'un quantum de flux ϕ_0 , appelé encore fluxon à travers des boucles de courant permanent. A la sortie, on récupère cette
5 impulsion de tension. Ces lignes de transmission Josephson permettent la transmission d'impulsions logiques sans distorsion.

Si deux impulsions sont appliquées successivement en entrée, deux fluxons sont générés dans la ligne et se propagent le long de cette ligne. Ces deux fluxons sont séparés dans la ligne par une distance
10 représentative de l'intervalle de temps séparant les deux impulsions appliquées en entrée.

Cependant, en raison d'une interaction répulsive entre les fluxons générés, si la distance d entre les deux fluxons est suffisamment courte pour que cette interaction répulsive ait une force significative, une redistribution spatiale
15 s'opère dans la ligne, qui se traduit en sortie par un intervalle de temps séparant les deux impulsions différent de celui observé à l'entrée de la ligne. En d'autres termes, dans la ligne, une impulsion a été accélérée et l'autre ralentie. Ce phénomène est bien expliqué dans un article intitulé "*Fluxon interaction in an overdamped Josephson Transmission line*" de V.K.
20 Kaplunenko, (Applied Physic Letters 66 (24) 12 June 1995) avec une illustration numérique de ce phénomène observé expérimentalement sur une ligne de transmission Josephson comprenant 200 jonctions Josephson shuntées, couplées en parallèle par une inductance supraconductrice et de fréquence caractéristique $f_c=104$ Ghz. On applique en entrée de cette ligne
25 deux impulsions de tension à 9,6 ps (picosecondes) d'intervalle, correspondant à f_c^{-1} . Le long de la ligne, l'intervalle de temps entre les deux fluxons qui se propagent augmente. En sortie, on obtient deux impulsions de tension à 27 ps d'intervalle. Du fait de la répulsion entre les fluxons, une impulsion a été ralentie, l'autre accélérée, entraînant une augmentation de
30 l'intervalle de temps séparant les deux impulsions. Ce phénomène de modification n'est observé en pratique que pour une distance entre les fluxons correspondant à un intervalle de temps inférieur à un délai de saturation de la jonction, évalué à $3f_c^{-1}$, soit de l'ordre de 28,8 ps dans l'exemple. Si la distance est trop grande entre les fluxons, la contrainte n'est
35 pas assez forte. Il faut donc que les fluxons générés soient suffisamment

proches, pour que la contrainte soit forte. Dans l'exemple, si on injecte dans la ligne deux impulsions à 30 picosecondes d'intervalle, cet intervalle est inchangé en sortie de la ligne.

Une séquence de bits représentant des données logiques peut
5 ainsi être modifiée dans la ligne de transmission Josephson, sous l'effet de l'interaction répulsive entre les fluxons, ce qui équivaut à une perte d'information logique. Dans un système logique cette perte d'information peut avoir des répercussions graves : perte brute d'information, désynchronisation (comparateur de phase)... Pour éviter ce problème d'interaction, l'auteur de
10 l'article préconise de dimensionner la ligne pour que la séparation temporelle entre deux fluxons générés dans la ligne ne soit pas inférieure à $3\phi_c^{-1}$, soit dans l'exemple, à 28,8 ps (valeur de saturation). Un dimensionnement adapté est obtenu notamment en jouant sur le courant critique, la résistance normale et sur la valeur des inductances dans la définition du circuit. On peut
15 ensuite réduire en opérationnel les effets des interactions en jouant sur le courant de polarisation des jonctions Josephson.

Dans l'invention, on s'est intéressé à cet effet d'interaction répulsive entre les fluxons pour en retirer un effet technique avantageux, sur la filtration du bruit blanc d'un signal issu d'une source quasi-périodique.
20 L'idée à la base de l'invention, est d'utiliser cet effet sur une série d'impulsions d'un signal d'horloge issu d'une source quasi-périodique quelconque, de fréquence fondamentale f_0 , pour abaisser le niveau de bruit blanc de ce signal, par rapport au niveau du fondamental. En effet, si on prend le cas d'un signal d'horloge de type à impulsions de tension, le niveau
25 de bruit blanc se traduit par une dispersion temporelle des impulsions du signal, et par suite, par une dispersion de la distance spatiale entre les fluxons générés dans la ligne de transmission supraconductrice.

L'effet d'interaction sur toute la longueur de la ligne entraîne que l'on observe une redistribution des fluxons dans l'espace confiné de la ligne,
30 du au comportement statistique des grands nombres, autour d'une valeur lissée, correspondant à une valeur moyenne de la distance inter-fluxon. Cette redistribution spatiale des fluxons a comme effet direct une redistribution temporelle des impulsions en sortie.

On a vu que le bruit blanc du signal quasi-périodique se traduit
35 sur le signal par une dispersion temporelle des impulsions, et dans la ligne

de transmission supraconductrice, par une dispersion de la distance spatiale entre deux fluxons successifs.

Du fait de la nature périodique du signal à l'entrée, les fluxons s'organisent dans la ligne selon un réseau périodique. Dans la ligne de transmission Josephson, il s'agit d'un réseau périodique unidimensionnel, selon la direction de propagation des quanta de flux. Après un certain nombre d'impulsions, qui correspondent à un délai transitoire, une redistribution de ce réseau s'établit, avec une distance inter-fluxon lissée autour d'une valeur moyenne.

Ainsi le phénomène d'interaction répulsive entre les fluxons associé à la statistique des grands nombres, conduit à une redistribution homogène des fluxons dans le réseau, ce qui se traduit en sortie de la ligne par une réduction du niveau de bruit blanc du signal quasi-périodique.

De façon générale, selon l'invention, en prenant tout système physique apte à générer des particules ayant entre elles des interactions répulsives pour une distance entre particules inférieure à une valeur de saturation du système (fréquence caractéristique), comme des électrons (circuits quantroniques) des quanta de flux, des vortex, on peut réduire le bruit de phase par réorganisation du réseau de particules dans le système physique.

Telle que caractérisée, l'invention concerne donc un dispositif de réduction du bruit de phase d'un signal issu d'une source quasi-périodique de fréquence fondamentale f_0 . Selon l'invention, ce dispositif comprend un système physique de transmission d'impulsions par transfert de particules ledit système étant défini pour avoir une fréquence caractéristique f_c définissant une plage de fréquence de fonctionnement du dispositif avec une limite basse liée à ladite fréquence caractéristique, telle que pour le signal quasi-périodique appliqué en entrée, lesdites particules ont une interaction répulsive entre elles, ledit système fournissant en sortie des impulsions à la fréquence fondamentale f_0 .

L'invention concerne aussi un dispositif de réduction du bruit de phase d'un signal issu d'une source quasi-périodique de fréquence fondamentale f_0 . Selon l'invention, il comprend un circuit supraconducteur à ligne active de transmission d'impulsions de tensions par transfert de quanta de flux ϕ_0 , ledit circuit étant défini pour avoir une fréquence caractéristique

f_c telle que $0,3f_c \leq f_0$ où f_0 est la fréquence fondamentale du signal quasi-périodique (S_e) appliqué en entrée, et fournissant en sortie un signal d'impulsions de tension de fréquence fondamentale f_0 .

On peut améliorer la réduction du bruit de phase, en définissant
5 un circuit supraconducteur à ligne active de transmission d'impulsions de tension tel que les quanta de flux générés dans le circuit sous l'effet de l'application du signal quasi-périodique s'organisent selon un réseau périodique bidimensionnel. Ainsi, les interactions entre les quanta de flux opèrent entre plus proches voisins selon les deux dimensions du réseau.

10 L'invention s'applique non seulement aux quanta de flux générés dans une ligne de transmission Josephson, mais plus généralement à tout circuit supraconducteur à ligne active de transmission d'impulsions de tension. En particulier, il s'applique aussi aux lignes de transmission de flux de vortex : ligne de transmission à une jonction longue Josephson, à flux de
15 vortex Josephson, ligne à fente ou micropont, à flux de vortex d'Abrikosov.

Le dispositif de réduction de phase peut en outre être utilisé de façon avantageuse dans un circuit multiplieur de fréquence.

D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront
20 plus clairement à la lecture de la description qui suit, faite à titre indicatif et non limitatif de l'invention et en référence aux dessins annexés, dans lesquels :

- la figure 1 déjà décrite illustre la densité spectrale $A(\sin)$ d'un signal issu d'une source quasi-périodique ;
- 25 - la figure 2 représente un schéma électrique d'un dispositif de réduction de phase selon l'invention basé sur une ligne de transmission Josephson comprenant une pluralité de jonctions Josephson ;
- la figure 3 représente un premier exemple de réalisation d'une telle ligne, selon une technologie à jonctions sur bi-cristal ;
- 30 - la figure 4a représente schématiquement un réseau périodique de fluxons générés par un signal d'horloge impulsionnel dans la ligne de transmission Josephson et
- les figures 4b et 4c illustrent le phénomène de redistribution temporelle des impulsions de tension dans une telle ligne ;

- la figure 5a représente un autre exemple de réalisation d'un dispositif de réduction de phase comprenant deux lignes de transmission Josephson disposées en parallèle dans le même plan de surface et
 - la figure 5b est une illustration du réseau périodique des fluxons correspondant ;
 - les figures 6a et 6b illustrent schématiquement deux variantes d'utilisation de deux lignes de transmission Josephson en parallèle dans un dispositif à réduction de phase, afin d'améliorer l'efficacité de la correction ;
 - la figure 6c est une variante des figures précédentes avec $n = 3$ lignes de transmission Josephson en parallèle, avec une illustration du réseau périodique des fluxons correspondant ;
 - la figure 7 montre un exemple d'utilisation d'un dispositif de réduction du bruit de phase dans un circuit doubleur de fréquence ;
 - les figures 8a et 8b représentent un autre exemple de réalisation d'un dispositif de réduction de phase à ligne de transmission Josephson dans une technologie de jonction sur rampe ;
 - les figures 9a et 9b représentent deux modes de réalisation d'un dispositif de réduction du bruit de phase, à ligne de transmission à jonction longue Josephson ;
 - les figures 10a et 10b représentent un dispositif de réduction du bruit de phase à ligne à fente ou micropont, à flux de vortex ;
 - la figure 11 est une illustration du réseau périodique des vortex générés dans une telle ligne.
- La figure 1 montre la densité spectrale $A(\text{Sin})$ d'un signal Sin issu d'une source quasi-périodique et appliqué comme signal d'horloge dans un système logique. Dans l'invention, on cherche à réduire d'au moins un facteur 10 le rapport bruit de phase sur signal $N2/N1$, qui est de l'ordre de -115 à -120 dBc pour des signaux issus de sources quasi-périodiques classiques (oscillateurs). Une telle réduction est particulièrement avantageuse dans le domaine de l'électronique à très haute fréquence et en particulier dans les systèmes basés sur les circuits logiques RSFQ, à supraconducteur à haute température critique, dans lesquels le bruit thermique est faible. On bénéficie alors pleinement d'un signal dont le bruit à court terme a été singulièrement réduit.

La figure 2 illustre un premier mode de réalisation d'un dispositif à réduction du bruit de phase selon l'invention, comprenant un circuit supraconducteur à ligne de transmission d'impulsions de tension, à l'entrée duquel le signal S_{in} à traiter est appliqué et qui fournit en sortie un signal Sout, duquel le bruit de phase a été réduit.

Dans cet exemple, la ligne de transmission est une ligne de transmission Josephson, comprenant une pluralité de jonctions Josephson $JJ_1, JJ_2, \dots, JJ_{200}$, représentées selon leur schéma électrique simplifié. Les jonctions Josephson sont shuntées, montées en parallèles, et couplées les unes aux autres par des inductances supraconductrices $LS_1, LS_2, LS_3, \dots, LS_{200}$. Une inductance supraconductrice LS_0 est aussi prévue en entrée, entre une électrode signal d'entrée A et la première jonction Josephson JJ_1 .

Le signal d'entrée est appliquée aux bornes de la ligne, entre deux électrodes signal d'entrée A et M. Le signal de sortie Sout est obtenu en sortie de la ligne, entre deux électrodes signal de sortie, B et M'. Les électrodes M et M' sont les électrodes de masse de la ligne. Les jonctions sont polarisées en courant I_p , inférieur au courant critique I_c des jonctions, en sorte qu'une boucle B_c de courant permanent s'établit dans chaque cellule fermée par une jonction.

L'application d'une impulsion en entrée d'une telle ligne augmente le courant de la jonction au-dessus du courant critique. L'effet Josephson se produit : un quantum de flux traverse la boucle de courant ; une impulsion de tension correspondante apparaît aux bornes de la jonction. L'impulsion de tension se propage ainsi dans la ligne, sans déformation.

Si on applique un train d'impulsions d'un signal d'horloge, on récupère en sortie un train correspondant. Selon l'invention, on choisit les caractéristiques de la ligne pour obtenir une fréquence caractéristique f_c déterminée. Cette fréquence caractéristique f_c définit une plage de fréquence de fonctionnement du dispositif avec une limite basse liée à cette fréquence caractéristique : Pour un signal quasi-périodique appliqué en entrée dont la fréquence fondamentale est comprise dans la plage de fonctionnement ainsi définie, on obtient une interaction répulsive efficace, qui permet de réduire le plancher de bruit blanc de ce signal.

Plus particulièrement, on choisit les caractéristiques de la ligne pour obtenir une fréquence caractéristique f_c qui vérifie $0,3f_c \leq f_0$. $0,3f_c$ est la limite basse de la plage de fonctionnement de ce dispositif.

Ainsi, en moyenne, la distance inter-fluxon est inférieure à la
5 valeur de saturation de la ligne. Le phénomène d'interaction répulsive entre les quanta de flux (fluxons) entraîne une redistribution spatiale des quanta de flux (fluxons) au long de la ligne, autour d'une valeur moyenne inter-fluxon, par lissage autour d'une valeur moyenne, correspondant à la valeur
10 moyenne de l'intervalle de temps entre deux impulsions. En sortie, le signal présente un écart type des intervalles de temps entre les impulsions considérablement réduit. De cette façon, le bruit à court terme ou bruit de phase du signal d'entrée est réduit.

Les caractéristiques d'une ligne de transmission Josephson sont principalement les valeurs des inductances, fonction de la longueur de ligne
15 et de la technologie, notamment l'inductance mutuelle L_m et des caractéristiques des jonctions; courant critique I_c , résistance normale R_n . Pour ne pas trop compliquer le dessin de la figure 2, ces caractéristiques bien connues des jonctions Josephson, ne sont représentées que pour la première jonction JJ_1 .

20 Sur la figure 3, on donne un exemple de réalisation pratique d'un dispositif de réduction de phase selon l'invention avec un circuit supraconducteur du type à ligne de transmission Josephson comprenant une pluralité de jonctions Josephson, dans une technologie planaire à couche mince d'un supraconducteur à haute température critique (dans la suite, on
25 utilise l'acronyme français de ce terme, soit HTC), sur substrat bi-cristal.

Deux substrats 1 et 2, typiquement des substrats SrTiO_3 , ou encore des substrats MgO , ou YSZ, et dont les axes cristallins présentent un écart angulaire dans le plan de surface, sont soudés. Un film supraconducteur 3, typiquement un film d'un matériau de la forme
30 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_n$, $6 \leq n \leq 7$, est déposé (épitaxié) sur le plan de surface du bi-cristal, à cheval sur la ligne de soudure du substrat bi-cristal, en sorte qu'il se développe un joint de grain 4 tout le long de la soudure, sous le film supraconducteur, équivalent à une barrière électrique. Le film est ensuite gravé selon un motif d'échelle, chaque barreau de l'échelle correspondant à
35 une jonction Josephson.

Dans l'exemple, la largeur w d'un barreau est de l'ordre de 5 micromètres, la longueur l d'un barreau est de l'ordre de 20 micromètres et l'espace h entre deux barreaux est du même ordre (20 micromètres). Le film lui a une largeur de quelques micromètres, pour une épaisseur de quelques dixièmes de microns, ($0,3\mu\text{m}$ par exemple). Le substrat a une épaisseur de quelques centaines de micromètres, typiquement 300 à 1000 μm .

Une source de courant non représentée fournit un courant de polarisation à chacune des jonctions Josephson, typiquement de l'ordre de 100 microampères pour la technologie prise en exemple. Dans l'exemple, ce courant de polarisation est appliquée entre deux électrodes C et C' de polarisation en courant formées sur une portion 3' du film supraconducteur 3, conformée (gravée) de façon à distribuer ce courant tout au long de la ligne, au moyen de branches d'amenées du courant prévues par paires $b_1, b_1', \dots b_{100}, b_{100}'$, arrangées de part et d'autre de l'échelle formant la suite de jonctions. Dans l'exemple, une branche d'amenée de courant b_1 et sa branche complémentaire b_1' côté ligne de masse polarisent en courant les deux jonctions JJ_1 et JJ_2 situées de part et d'autre de ces branches. Pour une ligne comprenant deux cent jonctions Josephson, la source de courant est dimensionnée pour fournir un courant de polarisation de l'ordre de quelques dizaines de milliampères, par exemple 20 mA, distribués le long de la ligne.

Les électrodes signal d'entrée et de sortie A, M, B, M', typiquement en cuivre ou en or, sont formées à chaque extrémité du film, et de part et d'autre du joint de grain 4.

Par exemple, on définit une ligne de transmission Josephson comprenant deux cent jonctions, longue de 2 millimètres environ, avec un courant critique I_c de jonction de 125 microampères et une résistance normale R_n de 2 ohms définissant une fréquence caractéristique f_c : $f_c = I_c R_n / \phi_0 = 125 \cdot 10^{-6} \times 2 / 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ webers} = 116 \text{ gigaHertz}$, en technologie à films supraconducteurs (Niobium) (couches minces $0,1 \mu\text{m}$) à haute température critique sous 30 Kelvin, avec un courant de polarisation de 100 microampères ($< I_c$) pour chaque jonction. Si on applique en entrée de cette ligne, un signal d'horloge de fréquence fondamentale $f_0 \geq f_c/3$ de l'ordre de 50 à 100 gigolettes et présentant des impulsions très décalées

dans le temps (bruit à court terme), on peut prévoir en sortie un signal Sout dont le rapport bruit blanc sur signal est abaissé d'un facteur 10, soit de l'ordre de -130, -140 dBc (au lieu de -115, -120 dBc à l'entrée) .

La figure 4a représente schématiquement la structure en réseau des fluxons générés dans une telle ligne, sous l'effet d'un signal impulsionnel de tension appliqué en entrée Sin.

Si on représente la ligne comme un canal 5, les impulsions de tension du signal Sin sont injectées à une extrémité de ce canal, à une fréquence horloge f_0 . Des fluxons $flx_1, flx_2, \dots, flx_m$ sont générés dans le canal 5, qui s'organisent spatialement selon un réseau unidimensionnel correspondant à la direction de propagation des fluxons dans la ligne.

Du fait que l'on utilise une ligne de transmission, c'est à dire une ligne comportant un grand nombre de jonctions en sorte que la statistique des grands nombres s'applique (par opposition à un circuit logique supraconducteur du type ne comportant qu'un petit nombre de jonctions, tel qu'un registre à décalage), un effet de redistribution spatiale se produit par lissage de la distance inter-fluxon autour d'une valeur moyenne d_0 , qui correspond à une valeur moyenne de l'intervalle de temps entre deux impulsions du signal d'entrée. En d'autres termes, l'écart type des valeurs des intervalles de temps entre les impulsions dans le signal de sortie est réduit. Plus précisément, et en relation avec la figure 4b, le bruit de phase du signal Sin appliqué en entrée se traduit dans ce signal par une distribution temporelle dispersée. Les fluxons générés sous l'effet de ce signal sont aussi spatialement dispersés dans la ligne, comme représenté schématiquement sur la figure 4b. Comme on a choisit les caractéristiques de la ligne (f_c) pour que la distance entre les fluxons générés par le signal d'entrée Sin soit en moyenne inférieure à la valeur de saturation de la ligne, il y a interaction répulsive entre les fluxons plus proches voisins. Sur la figure, ces répulsions sont indiquées par des flèches. Dans l'exemple représenté sur cette figure, on suppose que la valeur de saturation correspond à un écart temporel de 22 picosecondes. Ainsi, dès lors que la distance inter fluxon correspond à un écart temporel inférieur à cette valeur, la répulsion mutuelle produit ses effets ($flx_1-flx_2, flx_2-flx_3, flx_4-flx_5$). Si cette distance est supérieure, il n'y a pas d'effets (flx_3-flx_4). Après une phase transitoire correspondant en pratique à une vingtaine d'impulsions, on a un effet de redistribution spatiale des fluxons

dans la ligne autour d'une valeur lissée de la distance inter fluxon. Dans l'exemple représenté schématiquement sur la figure 4c, cette valeur lissée, correspond à un écart temporel entre deux impulsions du signal de sortie Sout égal à 20 picosecondes.

5 Le signal de sortie a ainsi ses impulsions de tension qui sont distribuées de façon plus homogène, correspondant à une réduction du niveau de bruit de phase, par rapport au niveau de signal à la fréquence fondamentale f_0 . En pratique, avec une ligne de transmission telle que celle représentée sur la figure 3, on a pu observer une réduction d'un facteur 10
10 du rapport N_2/N_1 (figure 1).

La séparation spatiale, donc les interactions, dépendent du rapport de la vitesse de propagation des fluxons à la fréquence du signal. On peut jouer sur la vitesse des fluxons en modifiant le courant de polarisation. On peut donc ajuster le courant de polarisation en fonction de la fréquence du signal
15 d'entrée si besoin est.

Les figures 5a et 5b illustrent une variante de réalisation d'un dispositif de réduction de phase à circuit supraconducteur à ligne de transmission Josephson. Dans cette variante, le circuit supraconducteur comprend deux lignes de transmission Josephson. On soude alors un substrat 1 et un
20 substrat 1' de part et d'autre d'un substrat 2, pour former le substrat tri-cristal. On dépose un film supraconducteur sur les zones 3a et 3b, un au-dessus de chaque soudure, de façon à développer un joint de grain respectif, 4a, 4b. Sur ces figures, les branches d'amenées de courant distribuées le long de la ligne sont des fils, typiquement en cuivre, des plots de contact
25 correspondants 6 étant prévus sur les films.

Une telle réalisation permet d'améliorer l'efficacité de la redistribution spatiale dans les lignes, en ajoutant une autre dimension aux phénomènes d'interaction entre les fluxons. En disposant les films sur les zones 3a et 3b espacé l'un de l'autre d'un intervalle tel que la distance entre un fluxon dans
30 un film et un fluxon dans l'autre film soit inférieure à la valeur de saturation, on observe le même phénomène d'interaction : en d'autres termes, pour un circuit supraconducteur à deux lignes de transmission Josephson, les fluxons générés dans le circuit s'organisent selon un réseau périodique bidimensionnel. Typiquement, pour les exemples numériques des valeurs

caractéristiques de lignes et de fréquence f_0 donnés précédemment, il faut prévoir un intervalle de quelques microns.

Pour que cet effet soit efficace, il faut favoriser une configuration stable (en quinconce) du réseau périodique bidimensionnel des fluxons ramenés au circuit supraconducteur, typiquement sur une base triangulaire. Sinon, la répulsion peut avoir aléatoirement un effet suivant le sens de propagation x de la ligne ou le sens contraire. On est alors en situation instable. Si on se réfère à la figure 5a où les deux films formant les lignes de transmission Josephson sont parfaitement alignés en x et y , on obtient le réseau voulu en déphasant de π le signal appliqué en entrée de la deuxième ligne. On obtient un réseau périodique bidimensionnel à base triangulaire comme illustré sur la figure 5b. Le fluxon flx d'une ligne subit alors les interactions dues à quatre fluxons : deux fluxons flx_1 et flx_2 de part et d'autre de ce fluxon flx , sur la même ligne, et deux fluxons flx_3 et flx_4 sur l'autre ligne, situés de part et d'autre la bissectrice 7 de cette ligne passant par le fluxon flx .

Le déphasage de π peut être appliqué de différentes façon, comme représenté sur les figures 6a et 6b :

Sur la figure 6a, le déphasage de π est appliqué sur le signal d'entrée Sin. On prévoit alors de préférence que le signal issu de la source quasi-périodique 100 est appliqué à un circuit 101 pour être dupliqué en sortie. Un exemple de réalisation en logique RSFQ de ce circuit dédoubleur 101 est détaillé sur la figure, à titre d'exemple pratique. Il fournit deux signaux en phase en sortie.

Sur la figure 6b, le déphasage de π est appliqué au signal de sortie Sout₁ de la première ligne, et injecté dans la deuxième ligne. Dans ce cas les fluxons en début de la première ligne bénéficient de la redistribution spatiale déjà obtenue en sortie de cette première ligne : on a un effet rétro-actif positif. Une ligne d'interconnexion 102 est alors prévue pour amener le signal de sortie de la première ligne en entrée du déphaseur de la deuxième ligne. Cette ligne est typiquement réalisée selon une technologie de type coplanaire, strip, microstrip et avec des matériaux compatibles avec la technologie des lignes de transmission Josephson utilisée, ou peut également être une ligne de transmission Josephson.

Les deux lignes de transmission Josephson peuvent ne pas être alignées avec précision sur le substrat, la ligne d'interconnexion 102 peut aussi introduire un retard tel que les signaux de sortie S_{out1} et S_{out2} ne soit pas parfaitement déphasés de π . Dans ce cas les interactions entre les
5 lignes peuvent ne pas être optimales. On prévoit avantageusement de pouvoir modifier localement le courant de polarisation ip d'une ou plusieurs jonctions, pour adapter localement la vitesse de propagation des fluxons. Cette correction est facilement mise en œuvre du fait de la distribution du courant tout le long de la ligne, par des branches (figure 3) ou des fils (figure
10 5a) d'aménées du courant. Ainsi, on prévoit que le courant de polarisation ip des jonctions est de préférence variable, ajustable par jonction ou groupes de jonctions.

On peut en outre prévoir plus de deux lignes de transmission en parallèle dans le plan de surface du substrat. Sur la figure 6c, on a illustré un
15 exemple de circuit à trois lignes de transmission Josephson. Pour obtenir un effet positif d'interaction entre les lignes, qui favorise le déplacement des fluxons dans le sens de propagation x des lignes, on prévoit une ligne centrale Li_1 , recevant en entrée le signal d'entrée S_{in} , et deux lignes Li_2 et Li_3 de part et d'autre, recevant en entrée un signal déphasé de π , qui peut être le
20 signal d'entrée S_{in} comme représenté (cas de la figure 6a) ou le signal de sortie S_{out1} de la première ligne (cas de la figure 6b). On a toujours une organisation des fluxons selon un réseau périodique bidimensionnel, mais le nombre de lignes de ce réseau est augmenté. De cette façon, les fluxons de la ligne centrale Li_1 , sont soumis aux interactions de leur propre ligne et
25 aux interactions dues aux deux autres lignes, soit pour chaque fluxon, jusqu'à six interactions dues aux six fluxons les plus proches voisins, deux par ligne.

En augmentant le nombre de lignes en parallèles, on augmente le nombre d'interactions. Dans l'exemple à trois lignes (figure 6c), la ligne
30 centrale Li_1 bénéficie des interactions dues aux deux lignes Li_2 et Li_3 situées de part et d'autre, mais les lignes Li_2 et Li_3 ne bénéficient chacune que des interactions dues à la ligne Li_1 .

Le choix d'un plus grand nombre de lignes va dépendre du dimensionnement du dispositif que l'application peut admettre. On notera
35 que dans le cas de n lignes en parallèles, chaque ligne peut alors être

prévue moins longue, c'est à dire avec moins de jonctions, du fait de l'effet
rétro-actif de la redistribution combiné à la dimension supplémentaire des
interactions dans le réseau bidimensionnel ainsi constitué. Les
dimensionnements sont évalués en sorte que la statistique des grands
5 nombres puisse s'appliquer, pour produire l'effet de lissage de la distance
interfluxon désiré.

D'une manière générale, dans le cas de n lignes en parallèle, on
applique alternativement sur une ligne, le signal d'entrée, sur la suivante le
signal d'entrée déphasé (au moyen d'un circuit déphaseur – figure 6a). Par
10 exemple, les lignes de rang pair reçoivent le signal d'entrée (S_e) et les
lignes de rang impair reçoivent le signal d'entrée déphasé. Le signal de sortie
du dispositif est fourni en sortie d'une des lignes.

La figure 7 montre un exemple d'utilisation d'un dispositif de réduction
de bruit de phase dans un circuit doubleur de fréquence. Dans l'exemple, le
15 circuit comprend deux lignes en parallèle, la première recevant le signal
d'entrée S_{in} et l'autre le signal d'entrée déphasé. La première ligne fournit en
sortie le signal S_{out1} . L'autre ligne fournit en sortie le signal S_{out2} .

Les deux lignes sont disposées en sorte que les fluxons dans les
lignes interagissent entre eux, réduisant le bruit de phase à court terme. Les
20 deux signaux en sortie S_{out1} et S_{out2} ainsi obtenus en sortie sont appliqués
en entrées d'un circuit logique RSFQ de confluence (combineur), qui fournit
en sortie un signal $S_{(2f)}$ de fréquence double du signal d'entrée S_{in} , avec un
faible bruit de phase.

Ainsi, un dispositif de réduction du bruit de phase selon l'invention
25 peut être avantageusement utilisé dans un circuit doubleur de fréquence, et
plus généralement dans un circuit multiplieur de fréquence, par mise en
cascade de circuits de ce type, tout en maintenant un plancher de bruit de
phase extrêmement faible.

La figure 8a représente un autre exemple de réalisation d'une ligne de
30 transmission Josephson, qui peut être utilisé dans toutes les variantes de
réalisation d'un dispositif de réduction de phase selon l'invention qui viennent
d'être décrites. La figure 8b peut être utilisée dans une structure de ligne
simple ou de lignes multiples, mais alors empilées verticalement. Dans ces
deux figures 8a et 8b, il s'agit de lignes en technologie de jonctions sur
35 rampe, qui est une technologie multicouche SNS, acronyme de

Supraconducteur-Matériau Normal ou Isolant-Supraconducteur. Le matériau normal ou isolant est par exemple le PrBaCuO non supraconducteur, matériau de structure analogue à YBaCuO, compatible avec les caractéristiques de maille du supraconducteur. Une forme de peigne comprend un premier film supraconducteur 9 (couche mince) déposé sur une hétérostructure (8) de matériau normal ou isolant déposé sur l'électrode de base supraconductrice en grisé sur les figures, sur un substrat. Les dents du peigne ont une forme de rampe décroissante vers le substrat. Une fine couche d'isolant et un deuxième film supraconducteur 10 en forme de peigne sont déposés sur le substrat, l'extrémité des dents de ce peigne venant par dessus l'extrémité des dents du film 9 en supraconducteur du premier peigne. Les jonctions JJ_1 , JJ_2 ,...etc, sont ainsi formées dans le plan à l'endroit où la couche 8 de matériau normal ou isolant est amincie, entre les deux films 9 et 10 de supraconducteur.

La figure 8b est une variante de la figure 8a dans laquelle le deuxième film 10 de supraconducteur est "replié" sur le premier film 9, ce qui permet un gain de surface non négligeable.

La figure 9a représente un autre mode de réalisation d'un dispositif de réduction du bruit de phase, à circuit supraconducteur à ligne de transmission d'impulsions de tension. Dans ce mode, la ligne de transmission est réalisée par une jonction Josephson longue. Une telle jonction est typiquement obtenue dans une technologie tri-couche SIS, de préférence à supraconducteur à basse température critique : une couche mince 20 de matériau normal (ou isolant) (par exemple Al_2O_3), formant barrière entre deux couches 21 et 22 de supraconducteur (par exemple du Niobium). Un courant de polarisation i inférieur au courant critique I_c de la jonction longue Josephson est appliqué entre les deux couches 21 et 22 de supraconducteur. L'application d'impulsions en entrée de la ligne génère des flux de vortex (vortex Josephson) dans la couche de matériau normal qui sous l'effet du courant de polarisation (continu) de la ligne (force de Lorentz), se propagent vers la sortie. Le quantum de flux associé à chaque vortex est égal à ϕ_0 . Les mêmes effets d'interaction répulsive s'appliquent à ces flux de vortex générés sous l'effet du signal d'horloge \sin , qui s'organisent dans la ligne selon un réseau périodique unidimensionnel, et qui se propagent selon le sens de propagation x de la ligne.

Dans un exemple de réalisation typique, une telle ligne aura une longueur d'une centaine de nanomètres.

On peut mettre en parallèle plusieurs de ces lignes pour obtenir les mêmes effets avantageux vus précédemment, en les empilant verticalement, ce qui est faisable, mais plus délicat, comme représenté sur la figure 9b .

Le courant est de préférence distribué le long de la ligne comme représenté sur la figure 9b.

L'intensité du courant de polarisation peut être ajusté en fonction de la fréquence du signal d'entrée.

Un autre mode de réalisation d'un dispositif de réduction du bruit de phase selon l'invention est représenté sur les figures 10a et 10b, correspondant à un circuit supraconducteur de type II, à ligne active de transmission à flux de vortex d'Abrikosov. Le principe des flux de vortex d'Abrikosov est succinctement le suivant : en présence d'un champ magnétique croissant, le supraconducteur passe dans un état mixte normal-supraconducteur. Des courants se développent en surface du supraconducteur qui tendent à écranter le champ magnétique. Le flux magnétique qui rentre dans le supraconducteur se retrouve sous forme de lignes de champ regroupées en surface sur un disque de quelques dizaines d'angströms de rayon. Le flux contenu dans cette petite zone délimitée par des courants d'écrantage du champ magnétique qui circulent autour est égal à un quantum de flux ϕ_0 . Ces flux de vortex s'organisent selon un réseau périodique à base triangulaire en surface, comme représenté sur la figure 11. En injectant un courant continu orienté convenablement, ce réseau de flux de vortex se propage en translation, selon une direction orthogonale au courant (force de Lorentz).

Un avantage d'une telle ligne de transmission est que les flux de vortex s'organisent "naturellement" selon un réseau périodique bidimensionnel à base triangulaire.

En polarisant convenablement en courant le dispositif, l'application en entrée d'un signal électromagnétique génère un réseau de flux de vortex, qui se déplace en lignes L_v (figure 11) selon cette structure de réseau. En sortie, un dispositif de réception (une charge adaptée quelconque) reçoit les impulsions de tension associées.

En outre, si dans le matériau supraconducteur utilisé, par exemple du $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, les plans de macle sont disposés en parallèle, cette organisation devient naturelle : les lignes L_v correspondent aux plans de macles.

5 Selon l'invention, le circuit supraconducteur actif comprend (figures 10a, 10b), un film (couche mince) de supraconducteur 13 de type II, tel que $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ou $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ déposé (épitaxié) sur un substrat 12, par exemple, un substrat de SrTiO_3 . Une fente 14 est pratiquée sur toute la
10 largeur du film, ne laissant qu'un micropont 15 de film supraconducteur entre les deux parties 13a et 13b du film, de part et d'autre de la fente. Ce micropont a une hauteur inférieure ou égale à l'épaisseur du film. Dans l'exemple, ce micropont a une hauteur e de l'ordre de 0,1 micromètre, pour une longueur L de micropont, selon la direction de la fente, inférieure à cent micromètres et une largeur W , qui est aussi la largeur de la fente, supérieure
15 à cent micromètres.

Deux électrodes de polarisation 16 et 17 en courant continu i de quelques milliampères environ sont prévues à chaque extrémité du film. Deux électrodes signal d'entrée 18 et 19 sont prévues à une extrémité de la fente, sur chaque partie 13a, 13b du film de part et d'autre de la fente, pour
20 appliquer le signal d'entrée Sin , alternatif, tel qu'il impose périodiquement à l'entrée du micropont un champ magnétique local B_e supérieure au champ critique, de manière à générer des vortex v à la période de ce signal. Le signal d'entrée peut être un signal impulsionnel de tension. On peut aussi appliquer un signal alternatif de type sinusoïdal. En pratique la source du
25 signal d'horloge (non représentée) est adaptée en impédance, par rapport à l'impédance du micropont (quelques dizaines d'ohms).

Deux électrodes signal de sortie 20 et 21 sont prévues à l'autre extrémité de la fente, sur chaque partie 13a, 13b du film de part et d'autre de la fente, pour recueillir en sortie les impulsions de tension correspondant à la
30 transmission en ligne des vortex (figure 11).

En pratique, chaque impulsion de tension (ou chaque tension crête positive du signal alternatif) fait passer le champ magnétique local B_e en entrée du micropont au-dessus du champ critique du film supraconducteur provoquant la nucléation d'une collection de vortex. Le courant continu i

appliqué orthogonalement (force de Lorentz) selon la direction appropriée induit la circulation des vortex.

La génération des vortex est obtenue par la modulation du champ magnétique par le signal d'horloge appliqué en entrée. La polarisation
5 convenable du circuit induit la propagation des vortex selon la direction désirée, vers la sortie Sout du dispositif.

Pour favoriser encore le déplacement des vortex dans le sens désiré, on peut prévoir de placer le dispositif dans un champ magnétique continu faible B, par exemple de l'ordre de vingt milliteslas, orienté convenablement,
10 en sorte que les vortex soient orientés dans le même sens, par exemple en plaçant une paire de bobines de Helmholtz de part et d'autre du circuit.

Un tel circuit supraconducteur peut être avantageusement utilisé dans un étage doubleur de fréquence comme indiqué précédemment, avec un autre circuit similaire associé à un circuit déphaseur, dans un dispositif de
15 multiplication de fréquence.

Ainsi, dans ce mode de réalisation, la ligne de transmission comprend un film supraconducteur de type II à l'état mixte, déposé sur un substrat cristallin. Le film est polarisé en courant à ses extrémités et comprend une fente dans le sens de la largeur, excepté à l'endroit d'un micropont, la fente
20 séparant le film en deux parties. Le signal quasi-périodique est appliqué à une extrémité de la fente, entre les deux parties du film et le signal de sortie est obtenu à l'autre extrémité de la fente, entre les deux parties du film.

Avantageusement, un tel dispositif à supraconducteur est plongé dans un champ magnétique continu orienté perpendiculairement au plan de
25 surface de la fente.

L'invention qui vient d'être décrite utilise ainsi la structure périodique du réseau des quanta de flux générés (fluxons, vortex) et la propriété d'interaction répulsive de ces quanta de flux (assimilables à des dipôles magnétiques) pour réduire le bruit de phase d'un signal issu d'une source
30 quasi-périodique. Une utilisation avantageuse de ce dispositif selon l'invention permet de fournir un signal de fréquence multiple sans dégradation du bruit de phase.

L'invention s'applique plus particulièrement dans le domaine de la haute et très haute fréquence, dans des systèmes d'électronique rapide. En
35 particulier, un tel dispositif peut être utilisé dans des circuits logiques RSFQ.

REVENDEICATIONS

1. Dispositif de réduction du bruit de phase d'un signal (Sin) issu d'une source quasi périodique de fréquence fondamentale f_0 , caractérisé en ce qu'il comprend un système physique de transmission d'impulsions par transfert de particules, ledit système physique étant défini pour avoir une
5 fréquence caractéristique f_c définissant une plage de fréquence de fonctionnement du dispositif avec une limite basse liée à ladite fréquence caractéristique, telle que pour le signal quasi-périodique (Sin) appliqué en entrée, lesdites particules ont une interaction répulsive entre elles, ledit système fournissant en sortie des impulsions à la fréquence fondamentale f_0 .
- 10 2. Dispositif de réduction du bruit de phase d'un signal (Sin), issu d'une source quasi-périodique de fréquence fondamentale f_0 selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend un circuit supraconducteur à ligne active de transmission d'impulsions de tensions par transfert de quanta de flux ϕ_0 , ledit circuit étant défini pour avoir une fréquence
15 caractéristique f_c telle que $0,3 f_c$ soit inférieur ou égal à la fréquence fondamentale f_0 du signal quasi-périodique (Sin) appliqué en entrée, et fournissant en sortie un signal d'impulsions de tension de fréquence fondamentale f_0 .
- 20 3. Dispositif de réduction du bruit de phase, comprenant au moins deux circuits supraconducteurs selon la revendication 1 ou 2, un circuit de déphasage de π de l'entrée ou de la sortie d'un desdits circuits et un circuit de confluence pour réaliser un étage doubleur de fréquence dans un circuit
25 de multiplication de fréquence.
4. Dispositif de réduction du bruit de phase selon la revendication 2 ou 3, caractérisé en ce que le circuit supraconducteur comprend une ligne de transmission Josephson définie géométriquement avec ladite fréquence caractéristique.

5. Dispositif de réduction du bruit de phase selon la revendication 4, caractérisé en ce que la ligne de transmission Josephson est à jonction longue Josephson.

5 6. Dispositif de réduction du bruit de phase selon la revendication 4, caractérisé en ce que ladite ligne de transmission comprend une pluralité de jonctions Josephson shuntées en parallèle.

7. Dispositif de réduction du bruit de phase selon la revendication 6, caractérisé en ce que chaque ligne de transmission Josephson est du type
10 ligne à jonctions sur bi-cristal.

8. Dispositif de réduction du bruit de phase selon la revendication 6, caractérisé en ce que chaque ligne de transmission Josephson est du type
15 ligne à jonctions sur rampe.

9. Dispositif de réduction du bruit de phase selon l'une quelconque des revendications 5 à 8, caractérisé en ce que le circuit supraconducteur comprend plusieurs lignes de transmission Josephson
20 disposées en parallèle.

10. Dispositif de réduction du bruit de phase selon la revendication 9, caractérisé en ce qu'il comprend un circuit de déphasage de π en entrée d'au moins une ligne de transmission, appliquant sur ladite ligne, un signal
25 déphasé.

11. Dispositif de réduction du bruit de phase selon la revendication 10, caractérisé en ce que ledit circuit de déphasage reçoit en entrée le signal d'entrée (S_e) du dispositif.

30

12. Dispositif de réduction du bruit de phase selon la revendication 10, caractérisé en ce que ledit circuit de déphasage reçoit en entrée le signal de sortie d'une ligne.

13. Dispositif de réduction du bruit de phase selon la revendication 11, caractérisé en ce que le circuit supraconducteur comprend n lignes de transmission Josephson de rang 1 à n dans un même plan de surface d'un substrat, avec n entier ≥ 2 , et en ce qu'un signal parmi le signal d'entrée, et le signal d'entrée déphasé, est appliqué aux lignes de rang pair, et l'autre signal est appliqué aux lignes de rang impair, le signal de sortie étant fourni en sortie d'une des n lignes.

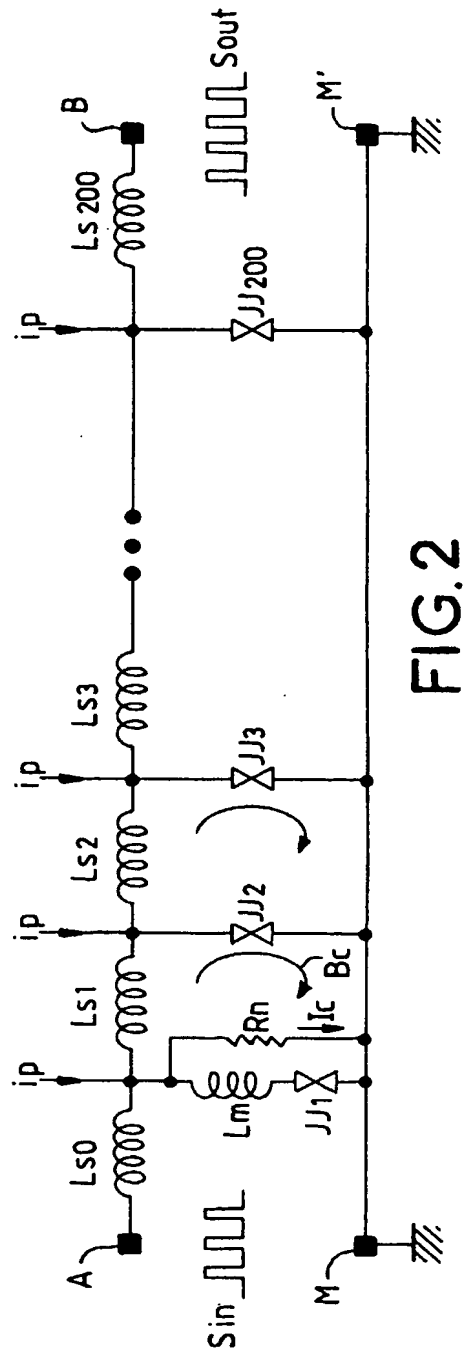
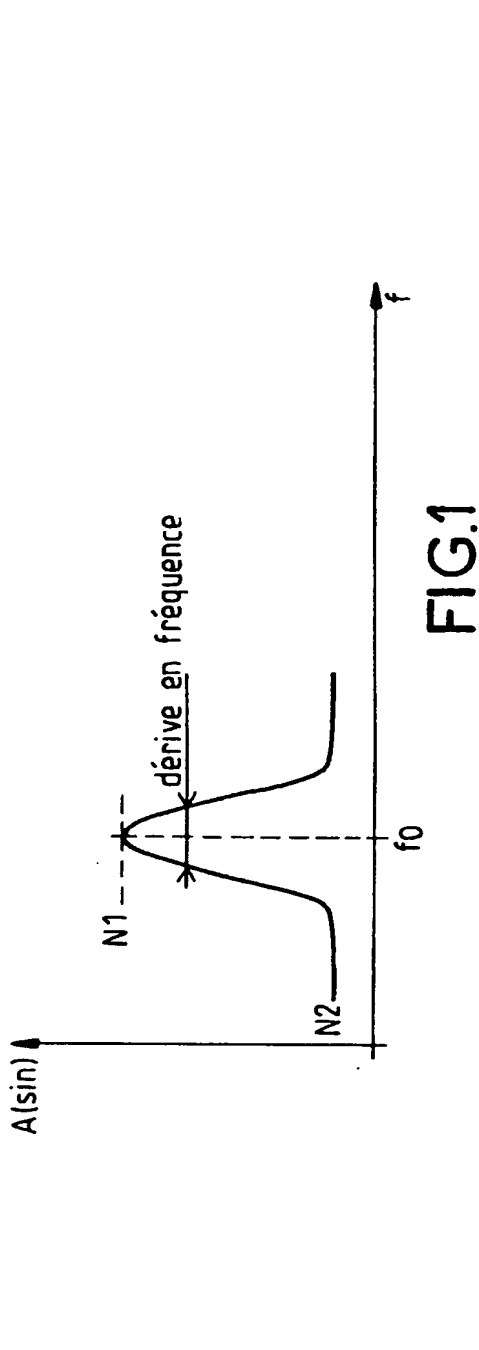
14. Dispositif de réduction du bruit de phase selon l'une quelconque des revendications 5 à 13 précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de polarisation en courant comprenant une pluralité de branches d'amenées du courant, pour distribuer ce courant le long de chaque ligne de transmission Josephson.

15. Dispositif de réduction du bruit de phase selon la revendication précédente, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens d'ajustement de l'intensité du courant de polarisation en fonction de la fréquence du signal d'entrée.

16. Dispositif de réduction du bruit de phase selon l'une quelconque des revendications 2 à 4, caractérisé en ce que le circuit supraconducteur comprend une ligne de transmission d'impulsions de tension à flux de vortex.

17. Dispositif de réduction du bruit de phase selon la revendication 16, caractérisé en ce que ladite ligne de transmission comprend un film supraconducteur de type II à l'état mixte, déposé sur un substrat cristallin, ledit film étant polarisé en courant à ses extrémités, et comprenant une fente dans le sens de la largeur, excepté à l'endroit d'un micropont, ladite fente séparant le film en deux parties, et caractérisé en ce que le signal quasi-périodique est appliqué à une extrémité de la fente, entre les deux parties du film, et le signal de sortie est obtenu à l'autre extrémité de la fente, entre les deux parties du film.

18. Dispositif de réduction du bruit de phase selon l'une quelconque des revendications 16 ou 17, caractérisé en ce que ledit dispositif à supraconducteur est plongé dans un champ magnétique continu orienté perpendiculairement au plan de surface de la fente.
- 5 19. Dispositif de réduction du bruit de phase selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le ou les circuits supraconducteurs utilisent un supraconducteur du type à haute température critique.



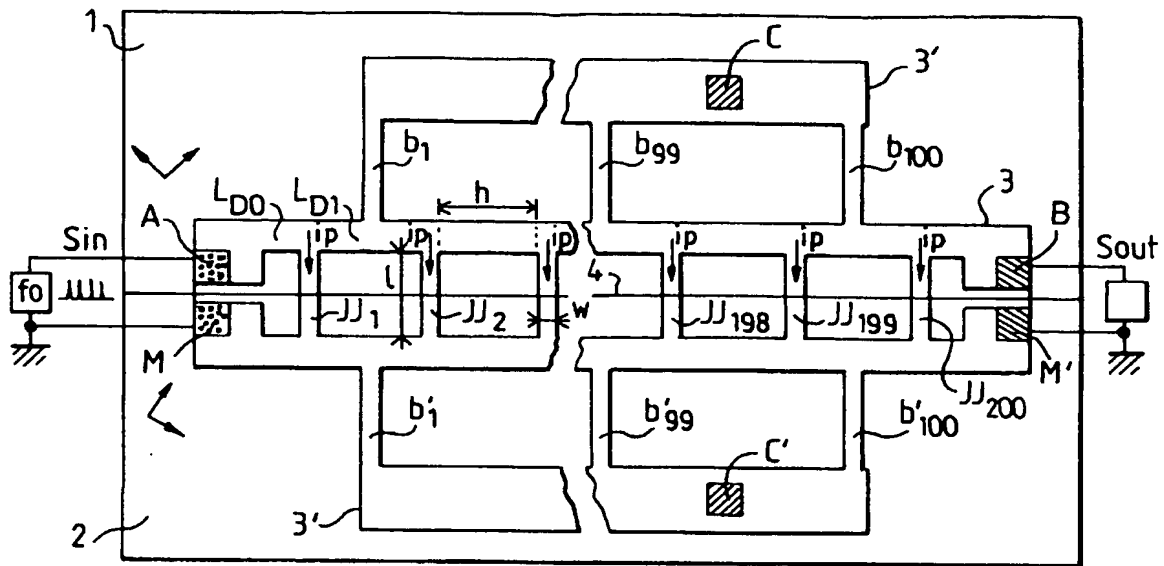


FIG.3

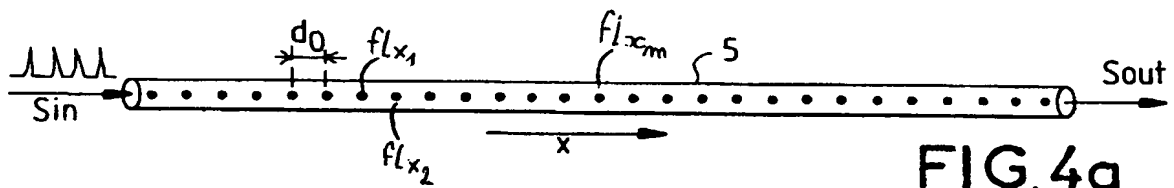


FIG. 4a

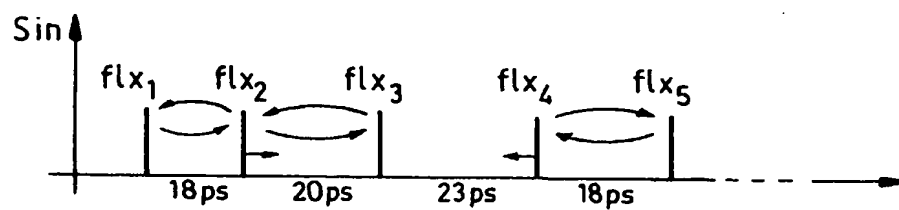


FIG. 4b

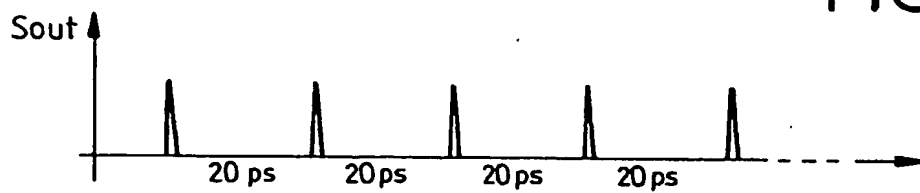
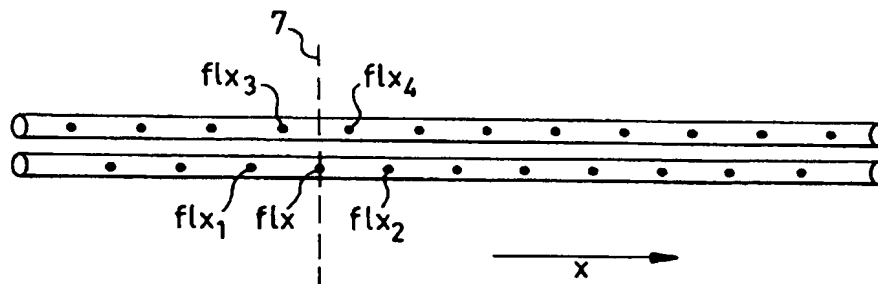
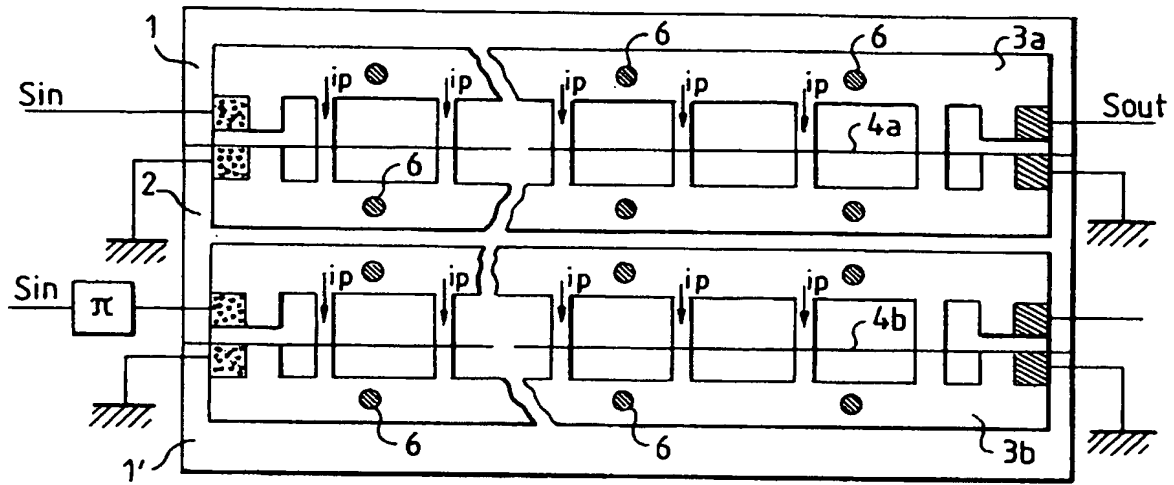
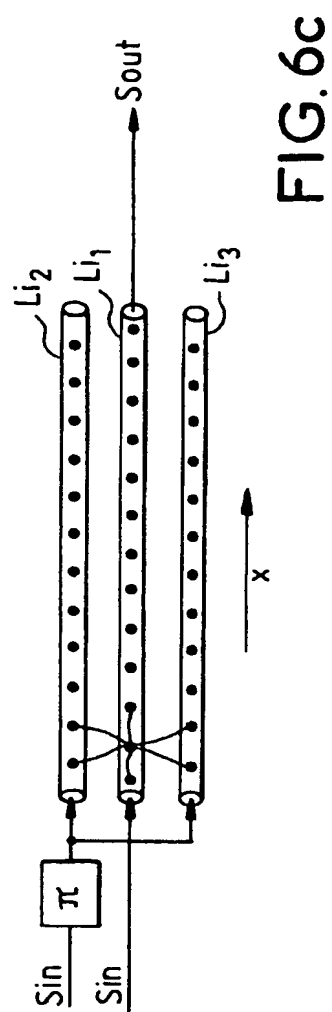
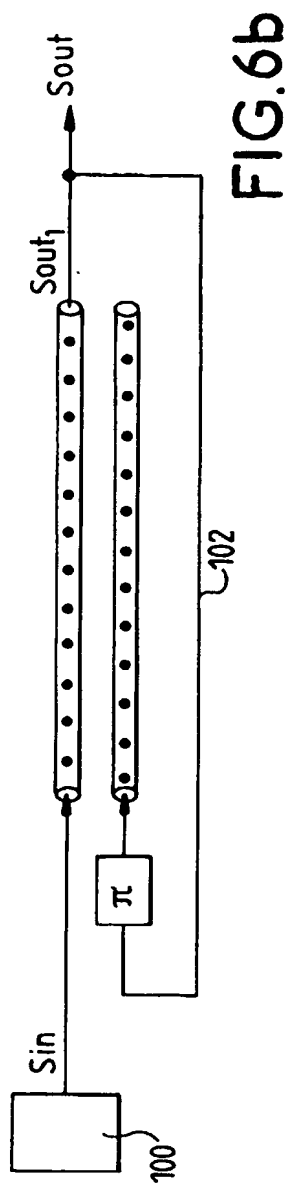
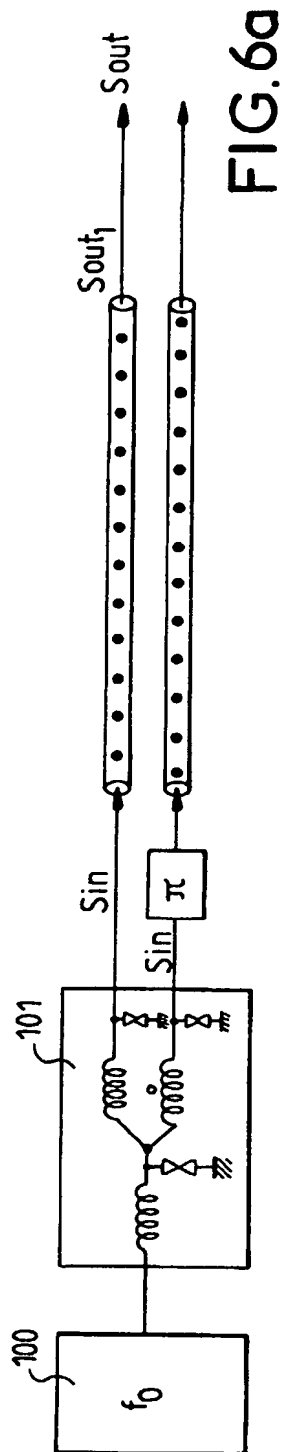


FIG.4c





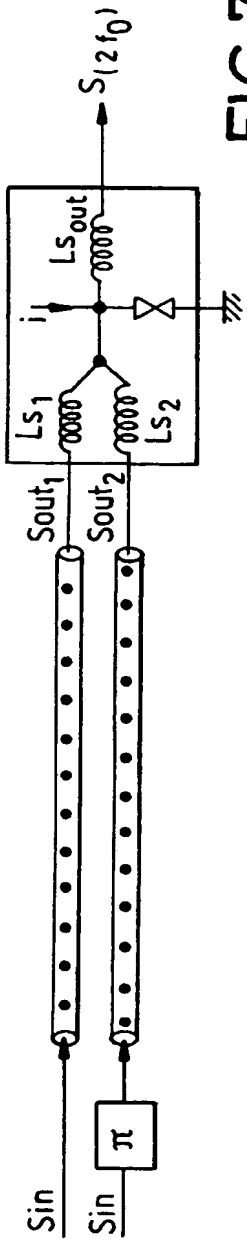


FIG. 7

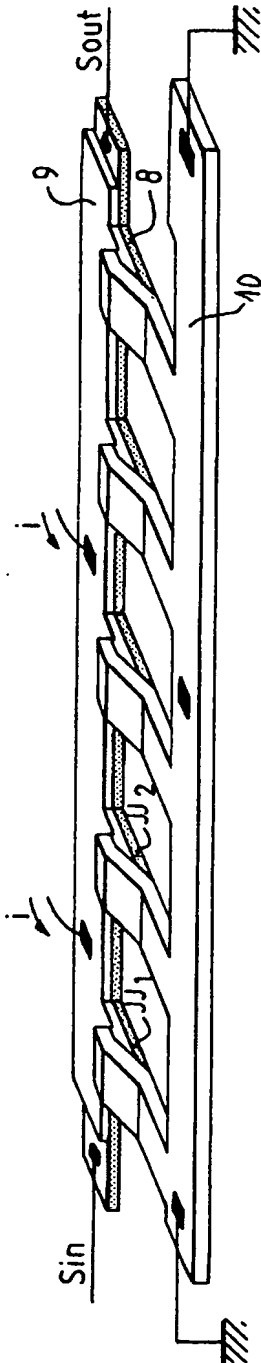


FIG. 8a

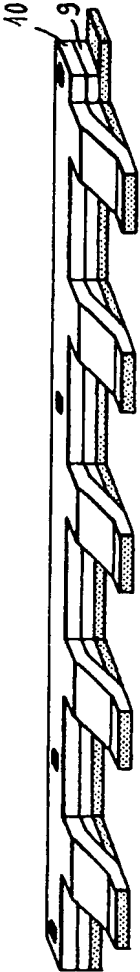


FIG. 8b

6/7

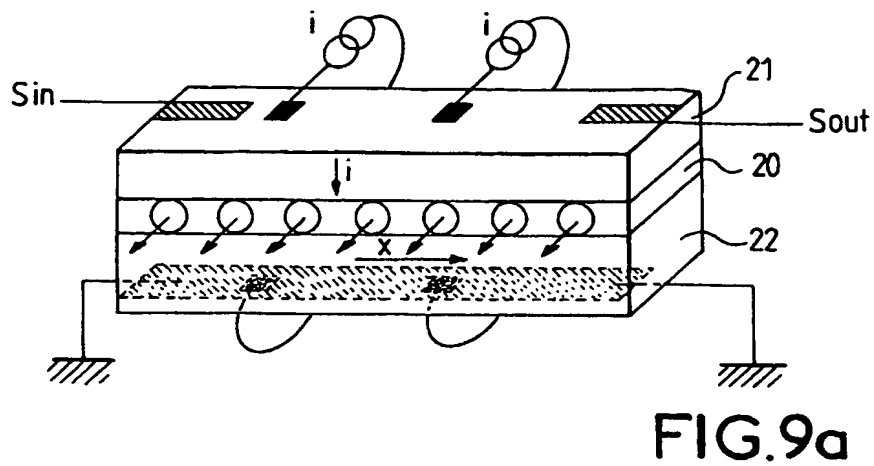


FIG. 9a

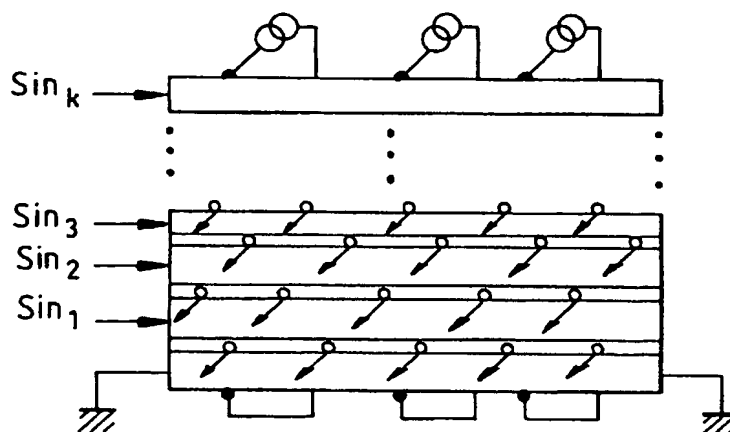


FIG. 9b

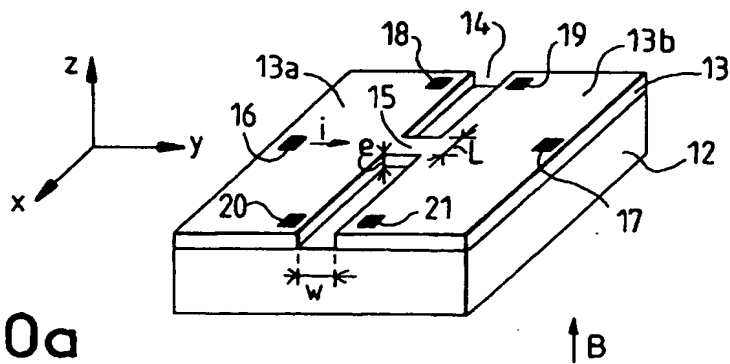
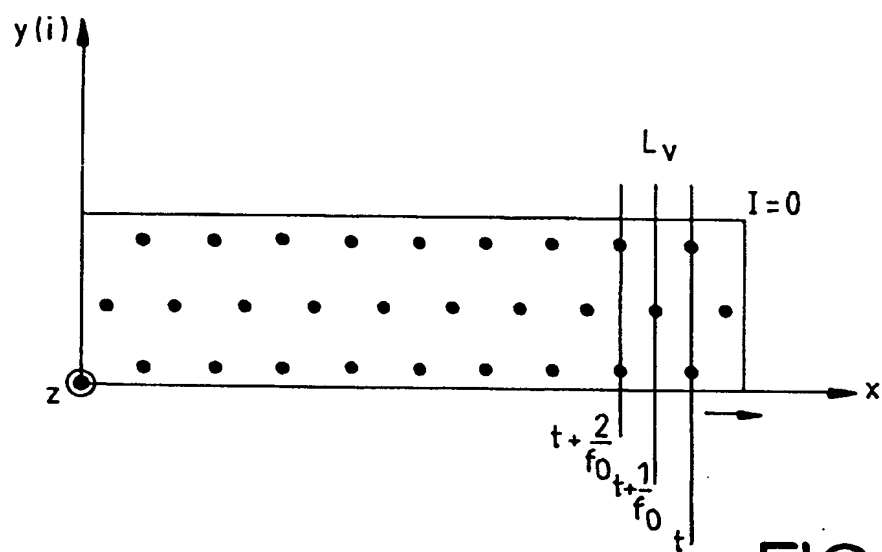
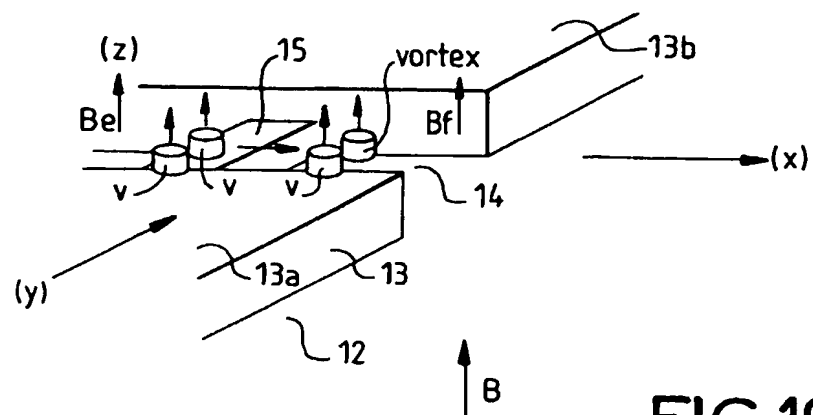


FIG. 10a



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No.

PCT/EP 03/50801

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 H03B15/00 H01L27/18

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 H03B H01L H03K

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

INSPEC, EPO-Internal, PAJ, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	KAPLUNENKO V K: "Fluxon interaction in an overdamped Josephson transmission line" APPLIED PHYSICS LETTERS, USA, vol. 66, no. 24, 12 June 1999 (1999-06-12), pages 3365-3367, XP002255909 ISSN: 0003-6951 cited in the application page 3365, column 1, line 8 -column 2, line 16; figure 1	1-19
A	US 5 963 351 A (DUBASH NOSHIR B ET AL) 5 October 1999 (1999-10-05) column 4, line 8-23 column 5, line 34-63 figure 1	1-19
	--- -/--	

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents:

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- *Z* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

1 March 2004

Date of mailing of the international search report

15/03/2004

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Meul, H

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No.

PCT/EP 03/50801

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	KOSHELETS V P ET AL: "Phase locked 270-440 GHz local oscillator based on flux flow in long Josephson tunnel junctions" REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, AIP, USA, vol. 71, no. 1, January 2000 (2000-01), pages 289-293, XP002255910 ISSN: 0034-6748 page 289, column 1, paragraph 2 -column 2, paragraph 1 ---	5
A	FITELSON M M: "Cryogenic electronic systems" PHYSICA C, ELSEVIER, NETHERLANDS, vol. 372-376, pt.1, 1 August 2002 (2002-08-01), pages 189-193, XP002255911 ISSN: 0921-4534 figure 8 ---	7,8
A	US 6 331 805 B1 (GUPTA DEEPNARAYAN ET AL) 18 December 2001 (2001-12-18) column 1, line 8 -column 2, line 24; figure 3A2 ---	1-19
A	WO 02 065631 A (ERICSSON TELEFON AB L M; FREDRIKSSON JESPER (SE)) 22 August 2002 (2002-08-22) page 1, line 10-21 page 5, line 9-15 page 6, line 4-10 ---	1-19
A	EP 0 467 104 A (HEWLETT PACKARD CO) 22 January 1992 (1992-01-22) column 18, line 48-58; figure 1 -----	1-19

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP 03/50801

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5963351	A	05-10-1999	AT 197212 T	15-11-2000
			AU 4156097 A	06-03-1998
			DE 69703393 D1	30-11-2000
			DE 69703393 T2	12-04-2001
			EP 0922333 A1	16-06-1999
			JP 2001504647 T	03-04-2001
			WO 9808307 A1	26-02-1998
US 6331805	B1	18-12-2001	NONE	
WO 02065631	A	22-08-2002	WO 02065632 A1	22-08-2002
			EP 1360757 A1	12-11-2003
			EP 1362411 A1	19-11-2003
			WO 02065631 A1	22-08-2002
EP 0467104	A	22-01-1992	US 5191236 A	02-03-1993
			EP 0467104 A2	22-01-1992
			JP 5175819 A	13-07-1993

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale No

PCT/EP 03/50801

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
CIB 7 H03B15/00 H01L27/18

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 7 H03B H01L H03K

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)

INSPEC, EPO-Internal, PAJ, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	KAPLUNENKO V K: "Fluxon interaction in an overdamped Josephson transmission line" APPLIED PHYSICS LETTERS, USA, vol. 66, no. 24, 12 juin 1999 (1999-06-12), pages 3365-3367, XP002255909 ISSN: 0003-6951 cité dans la demande page 3365, colonne 1, ligne 8 -colonne 2, ligne 16, figure 1	1-19
A	US 5 963 351 A (DUBASH NOSHIR B ET AL) 5 octobre 1999 (1999-10-05) colonne 4, ligne 8-23 colonne 5, ligne 34-63 figure 1	1-19
	-/-	

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

- *A* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- *E* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- *L* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- *O* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- *P* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- *T* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- *X* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- *Y* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- *Z* document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

1 mars 2004

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

15/03/2004

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Meul, H

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale No

PCT/EP 03/50801

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>KOSHELETS V P ET AL: "Phase locked 270-440 GHz local oscillator based on flux flow in long Josephson tunnel junctions" REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, AIP, USA, vol. 71, no. 1, janvier 2000 (2000-01), pages 289-293, XP002255910 ISSN: 0034-6748 page 289, colonne 1, alinéa 2 -colonne 2, alinéa 1</p> <p style="text-align: center;">---</p>	5
A	<p>FITELSON M M: "Cryogenic electronic systems" PHYSICA C, ELSEVIER, NETHERLANDS, vol. 372-376, pt.1, 1 août 2002 (2002-08-01), pages 189-193, XP002255911 ISSN: 0921-4534 figure 8</p> <p style="text-align: center;">---</p>	7,8
A	<p>US 6 331 805 B1 (GUPTA DEEPNARAYAN ET AL) 18 décembre 2001 (2001-12-18) colonne 1, ligne 8 -colonne 2, ligne 24; figure 3A2</p> <p style="text-align: center;">---</p>	1-19
A	<p>WO 02 065631 A (ERICSSON TELEFON AB L M; FREDRIKSSON JESPER (SE)) 22 août 2002 (2002-08-22) page 1, ligne 10-21 page 5, ligne 9-15 page 6, ligne 4-10</p> <p style="text-align: center;">---</p>	1-19
A	<p>EP 0 467 104 A (HEWLETT PACKARD CO) 22 janvier 1992 (1992-01-22) colonne 18, ligne 48-58; figure 1</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-19

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux familles de brevets

Demande internationale No

PCT/EP 03/50801

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 5963351	A	05-10-1999	AT 197212 T	15-11-2000
			AU 4156097 A	06-03-1998
			DE 69703393 D1	30-11-2000
			DE 69703393 T2	12-04-2001
			EP 0922333 A1	16-06-1999
			JP 2001504647 T	03-04-2001
			WO 9808307 A1	26-02-1998
US 6331805	B1	18-12-2001	AUCUN	
WO 02065631	A	22-08-2002	WO 02065632 A1	22-08-2002
			EP 1360757 A1	12-11-2003
			EP 1362411 A1	19-11-2003
			WO 02065631 A1	22-08-2002
EP 0467104	A	22-01-1992	US 5191236 A	02-03-1993
			EP 0467104 A2	22-01-1992
			JP 5175819 A	13-07-1993